EDITRICE
IL ROSTRO
MILANO

guida breve all'uso dei transistori

G. KUHN



GUIDA BREVE
ALL'USO DEI TRANSISTORI
PER I RIPARATORI

G. KUHN

GUIDA BREVE ALL'USO DEI TRANSISTORI PER I RIPARATORI

interpretare le caratteristiche e trovare i sostituti



EDITRICE MILANO

INDICE

INTRODUZIONE 1

CAPITOLO I - Il transistore 2

1 - I tre circuiti fondamentali 2
2 - Dati tecnici 5
3 - Distinzione tra valori massimi e caratteristiche . . . 6
4 - Valori massimi 6
4.1 - Tensioni 6
4.2 - Correnti 9
4.3 - Dissipazione 9
4.4 - Temperatura 11
5 - Caratteristiche 12
5.1 - Guadagno 15
5.2 - Corrente di fuga 16
5.3 - Tensione di saturazione 17
5.4 - Tempi di commutazione 17
6 - Come scegliere un transistore 19

CAPITOLO II - Prove 21

1 - Controllo dei transistori 21
2 - Transistore buono/cattivo 21
3 - Misura del guadagno di corrente 22
4 - Misura delle correnti di fuga 24
5 - Possibili misfatti nell'impiego dei transistori 26
5.1 - Misfatti meccanici 26
5.2 - Misfatti elettrici 27

CAPITOLO III - Il transistore a effetto di campo 29

1 - Generalità 29
2 - Caratteristiche 32
3 - I circuiti fondamentali 33
4 - Controlli e prove 34

INTRODUZIONE

Lo scopo di questo manuale vuole essere quello di un promemoria, preparato per dare assistenza a coloro che lavorano o sperimentano con transistori. Non é un libretto teorico, ma piuttosto il suo contenuto é derivato dall'esperienza pratica, e può essere utile sia al progettista, sia allo studente e al dilettante.

CAPITOLO I

IL TRANSISTORE

1 - I tre circuiti fondamentali

I transistori sono anzitutto dispositivi capaci di amplificare. Se si applica cioè all'ingresso un segnale, si trova all'uscita una versione amplificata di esso. Nel caso in cui esista continuamente una più o meno accurata proporzionalità fra il segnale di uscita e quello in ingresso, si dice che il transistore lavora in regime lineare. Se ciò non avviene, vuol dire che il transistore oltrepassa la regione lineare per trovarsi o all'interdizione, o alla saturazione, o eventualmente nella regione di valanga. Queste ultime situazioni possono verificarsi, perchè espressamente progettate, per esempio nell'impiego del transistore come commutatore. Ma anche in questi casi si può parlare di amplificazione in senso lato.

Sebbene esistano sei modi di applicare il segnale d'ingresso e di estrarre quello di uscita, sono solo tre le configurazioni realmente utilizzabili: a base comune, a emettitore comune e a collettore comune.

Nella connessione a base comune, indicata in fig. 1, il segnale é introdotto nel circuito emettitore-base, ed estratto dal circuito collettore-base (cioè la base è comune sia al circuito d'ingresso, sia a quello di uscita). Siccome il circuito d'ingresso emettitore-base ha una bassa impedenza compresa fra circa 0,5 e 50 ohm, mentre il circuito di uscita collettore-base ha un'impedenza elevata dell'ordine di 1.000 ohm a 1 Mohm), il guadagno di tensione o potenza in questo tipo di connessione può essere dell'ordine di 1.500 volte. Il guadagno di corrente invece é circa unitario, dell'ordine di 0,95 ÷ 0,995. Per quanto riguarda la fase, é facile constatare che essa é la medesima

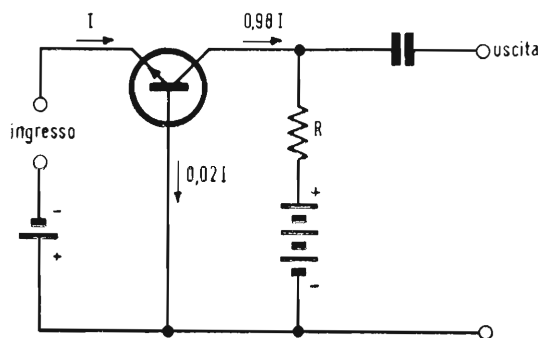


FIG. 1 - Configurazione del circuito a base comune. (Le batterie rappresentano le sorgenti di alimentazione necessarie per portare il transistore nel punto di lavoro più conveniente).

all'ingresso e all'uscita: infatti se la tensione del segnale all'ingresso va, per esempio, verso il negativo, essa provoca un aumento della corrente circolante nel transistore N-P-N e nella resistenza R. Il punto di uscita pertanto diventa meno positivo (cioé va pure verso il negativo). Possiamo quindi concludere che non c'é inversione di fase fra ingresso ed uscita in uno stadio amplificatore a base comune.

Nella connessione a emettitore comune (Fig. 2) il segnale é applicato fra base ed emettitore, ed estratto dal circuito collettore-emettitore. Le impedenze sono meno estreme che nel caso precedente: quella d'ingresso é generalmente compresa fra 20 e 5.000 ohm, e quella di uscita fra 50 e 50.000 ohm.

Il guadagno di potenza può essere dell'ordine di 10.000, perché questa connessione fornisce sia guadagno in tensione, sia guadagno in corrente molto superiori all'unità: valori tipici sono dell'ordine di 50. In questo circuito il segnale d'ingresso subisce un'inversione di fase: infatti quando la tensione del segnale all'ingresso va verso il negativo, fa diminuire la corrente iniettata nella base, e quindi la corrente totale che fluisce nel transistore. La minore caduta di tensione attraverso R fa sì che il punto di uscita diventa più positivo.

Il terzo tipo di connessione (Fig. 3) è denominato a collettore comune. In questa configurazione il segnale é introdotto fra base e collettore, ed estratto dal circuito emettitore-collettore. Poiché in questa connessione l'impedenza d'ingresso é elevata e quella di uscita molto bassa, ed il guadagno di tensione è circa unitario, il guadagno di potenza ottenibile é usualmente inferiore a quello in base comune o emettitore comune. Il guadagno di corrente é pari a quello realiz-

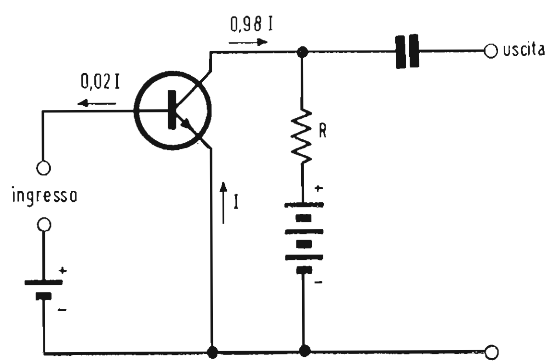


FIG. 2 - Configurazione del circuito ad emettitore comune.

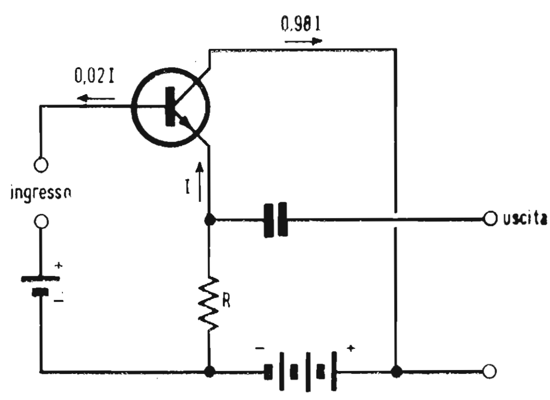


FIG. 3 - Configurazione del circuito a collettore comune.

zato nella connessione a emettitore comune. Per ciò che riguarda la fase, é facile vedere che non c'é inversione fra ingresso ed uscita: quando la base va verso il negativo, la corrente nel transistore diminuisce, e anche il punto di uscita (emettitore) va verso il negativo. Questo tipo di connessione, a collettore comune, é essenzialmente impiegato come dispositivo di adattamento fra un'alta impedenza e una bassa impedenza: esso ha il vantaggio, rispetto ad un trasformatore riduttore passivo, di possedere una larghezza di banda maggiore e di fornire un guadagno di potenza.

2 - Dati tecnici

Il termine « dati tecnici » é impiegato per indicare proprietà e valori elettrici di un transistore.

Il fabbricante, in genere, fornisce in maniera più o meno estesa questi dati, ed il progettista, dall'uso giudizioso di essi, può ricavare notevoli benefici.

L'intendimento di quanto segue é di spiegare le relazioni fra i dati pubblicati dal fabbricante e le effettive esigenze del progettista.

Un insieme ben preparato di dati tecnici dovrebbe fornire al progettista e al riparatore non soltanto tutte le informazioni necessarie per scegliere un transistore adatto ad una certa applicazione, ma dovrebbe anche aiutarlo ad individuare un transistore capace di sostituirne un altro di difficile approvvigionamento.

In quest'ultimo caso non é sempre possibile trovare l'esatto equivalente di un transistore (ciò che si fa consultando tutte le possibili liste di equivalenza o paragonando i dati tecnici). Ma anche se ciò avviene, non bisogna disperare: l'evoluzione nella tecnologia dei transistori é infatti così rapida che, con un po' di ragionamento, non si può mancare di trovare un nuovo tipo di transistore, che comprende e sorpassa le possibilità del transistore da sostituire. Notiamo, a proposito del problema di trovare un sostituto, che la situazione é notevolmente meno drammatica nel caso dei transistori che in quello dei tubi elettronici: ciò é principalmente dovuto alla mancanza di un circuito di accensione ed alle dimensioni più ridotte.

In generale i dati tecnici relativi ad un determinato tipo di transistore forniti dal fabbricante sono divisi in varie sezioni. Anzitutto é fornita una descrizione del tipo, seguita da una sezione che indica i valori limite, o massimi, a cui si può far lavorare il transistore, e poi da una sezione, che riporta le caratteristiche elettriche e termiche salienti. Infine sono comunicati i dati meccanici e le connessioni.

La descrizione del tipo dà una immagine generale delle applicazioni possibili, permettendo al progettista di classificare il transistore in relazione alle sue specifiche esigenze. Per esempio, nel caso di un transistore di potenza la descrizione indica se esso é stato progettato

per l'impiego in bassa frequenza, oppure come commutatore, la polarità, se é cioé del tipo P-N-P ovvero N-P-N, ed il materiale semiconduttore costituente.

Di qui in poi la scelta di un tipo specifico destinato ad una determinata applicazione, ovvero a sostituire un altro transistore, diventa più elaborata.

Non ultimo fra i fattori da considerare c'é il costo: é evidente che il progettista abile cercherà il transistore più economico, capace di soddisfare tutte le sue esigenze. Ciò richiede un esame totale ed una valutazione delle informazioni fornite dal costruttore, e solo una corretta interpretazione permette di fare un lavoro soddisfacente.

3 - Distinzione fra valori massimi e caratteristiche.

Un valore massimo si definisce come un limite del parametro a cui si riferisce, dato dal fabbricante, sorpassando il quale si può arrecare un danno permanente al transistore.

Una caratteristica invece é una proprietà misurabile del transistore posto a lavorare in determinate condizioni comprese entro i limiti di sicurezza ed a cui generalmente corrispondono le migliori prestazioni.

4 - Valori massimi.

Abbiamo visto che i valori massimi sono quelli al di là dei quali si possono produrre degradazioni del transistore. Essi sono stabiliti dal costruttore e dipendono dalla geometria interna del transistore, dal materiale semiconduttore e dal procedimento di lavorazione. Trattandosi di valori limite, molti cataloghi non stanno ad indicare per quali condizioni sono stati determinati. Pertanto i valori massimi rappresentano le capacità estreme di un transistore, e non vanno mai usati come caratteristiche di progetto.

Passiamo ora in esame i più importanti fra i valori massimi.

4.1 - Tensioni.

I valori massimi specificati come tensioni sono quelli che producono il fenomeno di valanga, la tensione essendo applicata in senso inverso ad una giunzione, oppure ai capi di entrambe le giunzioni, con una giunzione polarizzata in senso inverso e l'altra in uno stato specificato.

Come é noto il fenomeno di valanga, che nella maggior parte dei

casi é distruttivo per il transistore, é un fenomeno di ionizzazione nel cristallo semiconduttore analogo alla ionizzazione nei gas. Quando una giunzione é polarizzata in senso inverso circola solo una debole corrente di fuga composta di buchi (lacune) dalla regione di tipo N e di elettroni dalla regione di tipo P. Più la tensione è alta, più aumenta l'energia cinetica dei portatori di cariche (buchi e elettroni). Quando questi entrano in collisione con atomi del reticolo cristallino, possono cedere abbastanza energia da strappare un elettrone, creando cosi un'altra coppia buco-elettrone. A loro volta questi nuovi portatori sono accelerati dal campo elettrico, e possono produrre altre coppie buco-elettrone.

Questo é dunque il fenomeno di valanga, che si manifesta come un rapido aumento della corrente nella giunzione. Se la sorgente di alimentazione e la natura del carico limitano questo aumento, la giunzione perde temporaneamente la sua caratteristica rettificante; ma se l'aumento non é limitato, il calore generato può distruggere la giunzione. Notiamo che il primo caso é il modo normale di funzionamento dei tiristori e di altri semiconduttori di commutazione ed un modo eccezionale di funzionamento in alcune applicazioni dei transistori.

Il costruttore può specificare diversi valori di tensione massima (o di valanga) per un medesimo transistore. I più comuni sono i seguenti: (fra parentesi si indica il simbolo inglese comunemente impiegato)

— Tensione di valanga fra collettore e base, con l'emettitore aperto (V_{CBO})
— idem, fra collettore ed emettitore con la base aperta (V_{CEO})
— idem, fra collettore ed emettitore, con la base cortocircuitata all'emettitore (V_{CES})
— idem, fra collettore ed emettitore, con la base collegata all'emettitore attraverso ad una resistenza (V_{CER}).
— idem, fra collettore ed emettitore, con una tensione inversa applicata fra base ed emettitore (V_{CEX})

Come si può osservare queste sono le tensioni-limite che si possono applicare al collettore a seconda delle varie configurazioni del circuito base-emettitore, avendo la certezza che il fenomeno di valanga non si produrrà per tensioni inferiori. Questi valori permettono pertanto una prima selezione del transistore in funzone della tensione di alimentazione prevista, del tipo di carico (se é induttivo può dar luogo a sovratensioni sul collettore) e del tipo di polarizzazione della base. A proposito di quest'ultima condizione, c'è un altro valore di tensione massima da rispettare in un transistore:

— tensione di valanga fra base ed emettitore, con il collettore aperto (V_{EBO}).

Quest'ultimo parametro é specialmente da tenere presente nel

progetto di circuiti a commutazione e convertitori di corrente.

La fig. 4 riporta le caratteristiche idealizzate della corrente di collettore in funzione della tensione fra collettore ed emettitore, per i diversi collegamenti della base: ciò permette di vedere in che ordine sono le varie tensioni di valanga corrispondenti. Quella relativa alla giunzione collettore-base con l'emettitore aperto (non rappresentata in figura) é la più alta di tutte le precedenti. Si può notare che, salvo il caso di base (o emettitore) aperti, all'inizio della valanga compare una regione a resistenza negativa. Ciò significa che, una volta che la valanga si é stabilita, la tensione collettore-emettitore diventa minore di quella che ha sganciato la valanga (e tende a stabilizzarsi, analogamente a quanto avviene nel caso della ionizzazione dei gas). Alcuni costruttori indicano anche queste tensioni, che non sono più chiamate di valanga (breakdown in inglese), bensì di sostentamento (sustaining in inglese).

E' apparente da quanto precede che il parametro più conservativo per decidere la scelta é V_{CEO}, specialmente in circuiti con poca stabilizzazione.

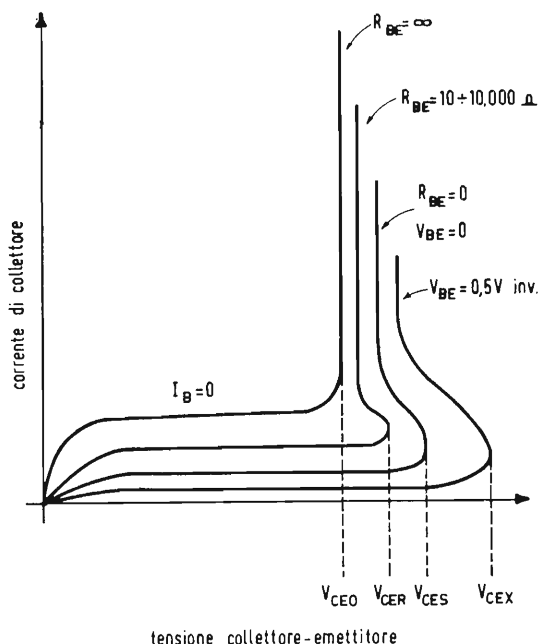


FIG. 4 - Locazione delle varie tensioni di valanga.

4.2 - Correnti.

In generale é indicato il valore massimo di corrente di collettore che può fluire continuamente. Talvolta un analogo valore é indicato per la base. Il primo é sovente quello che corrisponde ad un valore specificato nelle caratteristiche del guadagno di corrente (in qualche caso esso corrisponde ad un guadagno di corrente pari al 50% del guadagno di corrente massimo).

Un valore di corrente massimo, ammissibile solo in funzionamento intermittente (la cui durata é specificata) é anche, ma raramente, indicato.

Comunque, la decisione del valore massimo di corrente a cui si può effettivamente far lavorare il transistore dipende sempre da considerazioni di dissipazione del calore generato. In particolare, nel caso di funzionamento a impulsi, occorre sempre considerare anche la potenza dissipata nella transizione da interdizione a conduzione.

4.3 - Dissipazione.

La dissipazione massima ammissibile di un transistore é un dato termico, verificato dal costruttore con prove di durata di vita. Esso, se rispettato, ha lo scopo di limitare la temperatura delle giunzioni ad un valore che non ne pregiudica le caratteristiche.

La dissipazione é sovente indicata per differenti condizioni di montaggio. Per esempio in aria libera (per una temperatura ambiente di + 25 °C); questa é la condizione più gravosa, ed implica il valore più basso della dissipazione ammissibile. All'altro estremo si può trovare specificata la dissipazione ammissibile per una temperatura dell'involucro di + 25 °C: attenzione! questa é la condizione più utopistica, poichè essa presuppone, se la temperatura ambiente fosse anche di + 25 °C, un radiatore di calore infinito, con resistenza termica nulla fra l'involucro e l'ambiente, il che é irrealizzabile. In questo caso naturalmente il valore di dissipazione ammissibile risulta massimo. Ma entrambi questi valori sono utili, perchè essi danno il valore di dissipazione ammissibile nei casi limiti di aria libera e radiatore infinito, da cui si possono stimare le situazioni intermedie realizzabili per eliminare il calore.

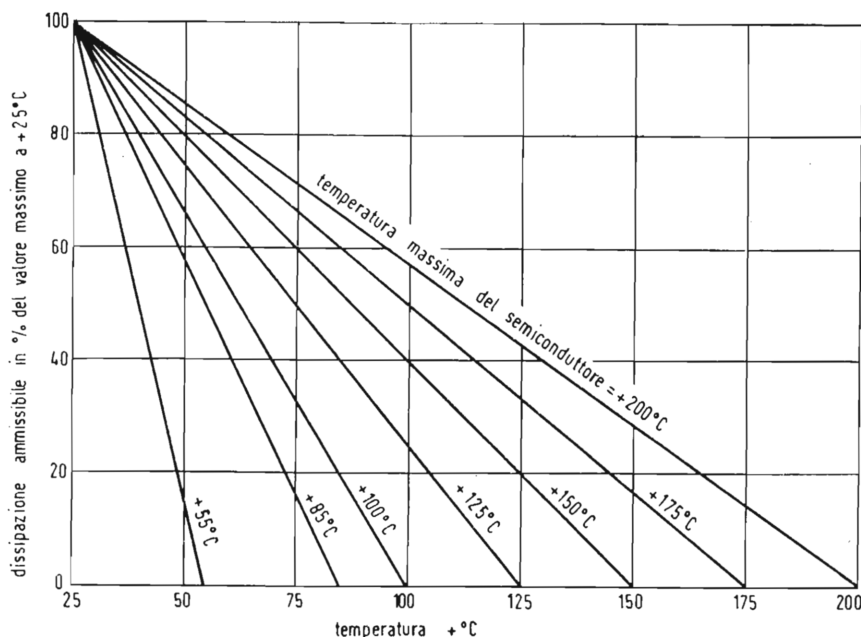
Per temperature più elevate il costruttore indica un fattore di riduzione, che è espresso in watt (o milliwatt) per grado centigrado di sopraelevazione di temperatura.

La dissipazione ammissibile decresce cioè proporzionalmente, a misura che la temperatura prevista di funzionamento aumenta. E naturalmente la dissipazione ammissibile si annulla alla temperatura massima indicata per il semiconduttore. In fig. 5 riportiamo una carta universale intesa a facilitare questo calcolo.

A questo punto possiamo parlare di un fenomeno distruttivo chiamato « deriva termica cumulativa », che può verificarsi in un circuito in cui la dissipazione del transistore è apparentemente anche molto al disotto della dissipazione massima ammissibile. In un qualunque circuito la temperatura T_G del materiale semiconduttore é determinata dalla dissipazione totale nel transistore P, dalla temperatura ambiente T_A e dalla resistenza termica K fra materiale e ambiente:

$$T_G = T_A + KP$$

Ammettiamo che il circuito funzioni in condizione stabile, e che tutti i valori siano bene al disotto dei massimi ammissibili: in questo stato di cose tutto è in ordine. Se ora la temperatura ambiente T_A aumenta leggermente, di una uguale quantità aumenterebbe la temperatura della giunzione T_G (e quindi senza danni) purché la dissipazione P resti costante. Purtroppo invece, come vedremo in seguito, sia il guadagno di corrente, sia quella componente della corrente nel transistore che si chiama corrente di fuga, aumentano con l'aumentare della temperatura della giunzione. Ciò pertanto provoca un au-



ammissibile per varie temperature ambiente.
FIG. 5 - Carta universale per determinare la dissipazione

mento della dissipazione. Questo fa ulteriormente aumentare la temperatura della giunzione. Questo fenomeno é rigenerativo, e una volta innescato dal modesto aumento della temperatura ambiente, non si arresta più, la temperatura della giunzione continua ad aumentare fino alla eventuale distruzione del transistore. E' in sede di progetto che si possono prendere dei provvedimenti (limitazione della corrente di collettore, uso di reazione negativa in corrente continua, stabilizzazione del punto di lavoro con termistori o altri elementi sensibili alla temperatura, ecc.), evitando che la deriva termica cumulativa possa verificarsi sotto qualunque condizione, o almeno fino a che la temperatura ambiente resta sotto ad un ragionevole valore. La condizione di stabilità é espressa dalla relazione:

$$\frac{\Delta T_G}{\Delta P} > K$$

Questa significa che non ci sarà deriva termica cumulativa se il rapporto fra una variazione della temperatura della giunzione rispetto alla variazione di dissipazione che l'ha provocata é maggiore della resistenza termica fra la giunzione e l'ambiente. I valori di ΔP e K si possono facilmente calcolare o misurare. Più difficile é conoscere la vera temperatura della giunzione T_G. Essa può venire calcolata misurando un parametro elettrico del transistore di cui sia conosciuta la variazione in funzione della temperatura del semiconduttore, come ad esempio una corrente di fuga (aumenta esponenzialmente con la temperatura) o la tensione diretta nel diodo costituito da base ed emettitore (diminuisce all'aumentare della temperatura). Ciò obbliga, oltre a prevedere una rapida commutazione del circuito per fare la misura, soprattutto a una calibrazione preliminare. Questa, a rigore, può solo essere effettuata a parte in un forno, lasciando stabilizzare la temperatura prima di ogni punto di misura, e tracciando quindi la curva di variazione con la temperatura del parametro scelto.

4.4. - Temperatura.

Il costruttore indica i limiti di temperatura entro cui si può immagazzinare il transistore. Per esempio da — 65 °C a + 300 °C.

Ciò significa che in questo campo di temperatura gli sforzi meccanici che si manifestano a causa delle varie dilatazioni e contrazioni non sono tali da causare una degradazione delle caratteristiche elettriche.

Inoltre il costruttore specifica anche la temperatura massima di funzionamento della giunzione, benché questo dato sia implicitamente

specificato dall'indicazione dei valori di dissipazione. Sta poi al progettista di evitare che il suo circuito incorra nella deriva termica cumulativa. E in genere ciò non basta. Il buon funzonamento elettrico di un transistore in una gamma più o meno estesa di temperatura ambiente richiede che tensioni e correnti restino praticamente stabili, affinché il punto di lavoro non si sposti eccessivamente. Facendo il progetto, occorre anzitutto prefiggere la gamma di temperatura. Se si tratta di un circuito per uso domestico si possono per esempio fissare i limiti a 0 °C e + 55 °C, perché é raro che in casa si possano sorpassare questi valori. Per un circuito da automobile invece i limiti devono essere molto più ampi.

Sovente la scelta fra germanio e silicio é dettata da considerazioni di temperatura. E il progetto può obbligare a complicazioni maggiori quando si impongono tolleranze più strette al variare della temperatura per certi parametri come la frequenza, l'amplificazione, la distorsione, ecc. Tener conto della temperatura ambiente e della temperatura massima della giunzione é pertanto la prima preoccupazione che il progettista deve avere.

E per quanto riguarda la durata di vita, l'effetto della temperatura della giunzione é profondo. Nel caso del silicio, passare da una temperatura della giunzione di + 180 °C ad una di + 190°, si dimezza la probabilità della durata di vita. E andando a + 200 °C essa diventa un quarto di quella a + 180 °C.

Ciò é dovuto ad una migrazione nel cristallo semiconduttore di atomi metallici dalle aree vaporizzate sul cristallo stesso per realizzare le connessioni esterne. Questa migrazione é sovente localizzata dove la densità di corrente é maggiore, e può portare alla formazione di una specie di spina metallica che avanza (in ore, giorni o mesi, a seconda della temperatura) fino a cortocircuitare la giunzione sottostante. In altri casi il metallo se ne va semplicemente all'interno da tutta l'area, e si verifica un circuito aperto.

5 - Caratteristiche.

Come abbiamo detto, le caratteristiche sono delle proprietà importanti di un transistore, che sono controllate dal costruttore durante la fabbricazione e comunicate all'utilizzatore per facilitargli i problemi di progetto o di intercambiabilità. Le caratteristiche quindi descrivono elettricamente il transistore.

Le caratteristiche possono essere fornite sotto forma di curve o di valori numerici. Le curve contengono un maggior numero di informazioni e possono venir usate per calcolare dei parametri addizionali del transistore. In ogni modo tutte le caratteristiche sono ottenute da misure elettriche sul transistore in vari circuiti e sotto condizioni ben definite di tensioni e correnti. Le caratteristiche statiche si

misurano applicando tensioni continue agli elettrodi del transistore; quelle dinamiche applicando una tensione alternata a uno degli elettrodi, con varie condizioni di tensioni continue sugli altri elettrodi.

I transistori si lasciano dunque descrivere, per quanto riguarda il loro comportamento elettrico, a mezzo di una serie di grafici, chiamati curve caratteristiche. Queste curve indicano come variano tensioni o correnti di un elettrodo quando si variano tensioni o correnti su un altro elettrodo.

Qualunque sia il circuito in cui il transistore é collegato, possiamo immaginare di riferire ogni misura ad uno dei tre elettrodi. Restano pertanto quattro grandezze di cui ci interessa conoscere la interdipendenza e precisamente tensione e corrente del secondo elettrodo, e tensione e corrente del terzo elettrodo. Sono quindi necessari quattro grafici per descrivere completamente il funzionamento del transistore.

Un'altra serie di quattro grafici é necessaria quando, per lo stesso transistore, si vogliano esprimere le caratteristiche con riferimento ad un altro degli elettrodi.

Una visione assolutamente completa del transistore si avrebbe quindi con una serie di dodici grafici. In realtà dodici grafici sono sovrabbondanti, o combinabili fra di essi in singoli grafici con famiglie di curve, ed in generale il costruttore ce ne fornisce solo una parte, che é sufficiente ai bisogni della calcolazione nei montaggi fondamentali con base comune ovvero con emettitore o collettore comune.

Di gran lunga la famiglia di curve più importante é quella di collettore: le curve si ottengono variando la tensione collettore-emettitore e misurando la corrispondente corrente di collettore, per diversi valori della corrente di base. (Fig. 9).

Un altro grafico di grande utilità é la curva di trasferimento, ottenuta variando la tensione (o talvolta la corrente) base-emettitore e misurando la corrente di collettore, con una tensione costante fra collettore ed emettitore.

Lo scopo fondamentale di questi grafici è quello di permettere al progettista di scegliere gli effettivi valori delle tensioni e correnti continue di alimentazione per far funzionare correttamente il transistore e ottimizzarne le prestazioni. Inoltre l'impiego di questi grafici é necessario nel progetto di stadi amplificatori di uscita, stadi di commutazione, cioè in tutti quei casi nei quali sono coinvolti segnali di grande ampiezza.

Esistono poi le applicazioni nelle quali il segnale è piccolo in confronto con le tensioni e correnti continue di alimentazone. In questi casi il punto di lavoro si sposta poco con le variazioni del segnale, e sarebbe tedioso e poco preciso calcolare guadagni, impedenze e altre grandezze dai grafici già visti.

Inoltre, per queste piccole variazioni, la curva caratteristica nell'intorno del punto di lavoro, si può ritenere rettilinea.

Per questo il costruttore, oltre alle curve caratteristiche, ci fornisce i parametri validi per uno o più determinati punto di lavoro (che di solito sono i più consgliabili per il transistore) sotto forma numerica.

A parte il caso di piccoli segnali, ci sono altri parametri che riguardano il comportamento del transistore agli estremi della regione normale di lavoro, quali per esempio le correnti di fuga e la tensione di saturazione, che sarebbe difficile derivare dai grafici con sufficiente approssimazione, e la conoscenza dei quali é sovente importante per il progetto. E' di grande utilità quindi trovarli indicati numericamente.

Altri parametri ancora debbono per forza essere indicati in forma numerica, come per esempio le capacità delle giunzioni, la figura di rumore, frequenze di taglio e tempi di commutazione, cioé tutti quelli che comunque non sono rilevabili dalle curve caratteristiche.

Alcuni costruttori estendono l'informazione dando anche le curve di variazione dei parametri con la temperatura (vedi fig. 6), o con la tensione, la corrente, ecc.

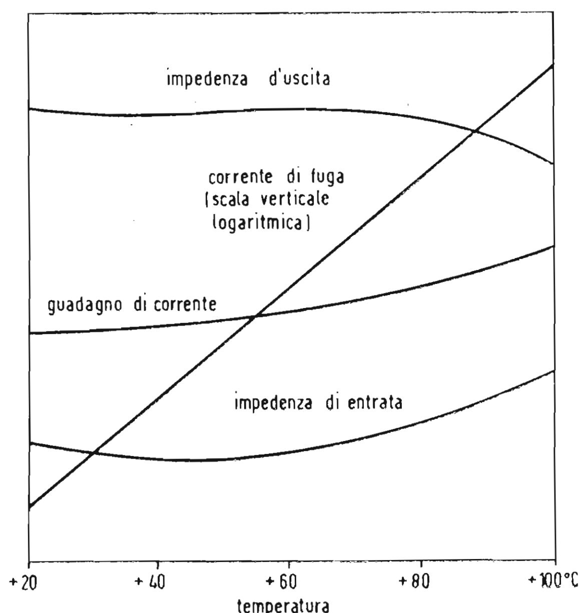


FIG. 6 - Variazione schematizzata dei parametri di un transistore con la temperatura.

5.1 - Guadagno.

Il guadagno di corrente è il rapporto fra la corrente nell'elettrodo di uscita e quella nell'elettrodo di entrata. Siccome il transistore può essere connesso in vari modi, la configurazione deve essere specificata. Il guadagno in base comune è generalmente chiamato α, e quello in emettitore comune β. Se ci si riferisce a correnti stazionarie, questi guadagni sono detti in corrente continua. Essi hanno importanza specialmente nel progetto di circuiti di commutazione, e sono anche deducibili dalle curve caratteristiche. Per il progetto di amplificatori si usa indicare i guadagni riferendosi al rapporto fra la variazione della corrente stazionaria di uscita e la variazione della corrente di entrata che l'ha provocata. I guadagni definiti in questo modo sono detti in corrente alternata. Questi guadagni variano in funzione della corrente di collettore, in generale decrescendo sia per correnti molto deboli, sia per correnti molto alte (ma nei limiti dei valori massimi). Un esempio é indicato in fig. 7.

I guadagni di un transistore variano anche con la frequenza: una caratteristica importante del transistore é la frequenza di taglio, che rappresenta la frequenza a cui il valore del guadagno di corrente cade a 0,707 volte il valore a 1 kHz. La frequenza di taglio é sempre più

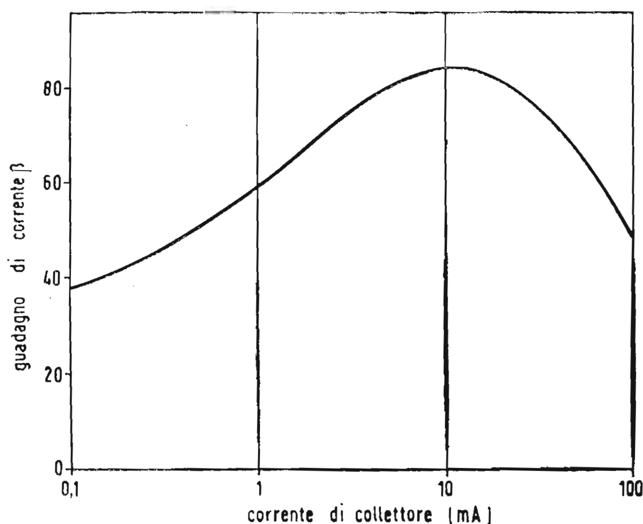


FIG. 7 - Variazione del quadagno di corrente β, con la corrente di collettore.

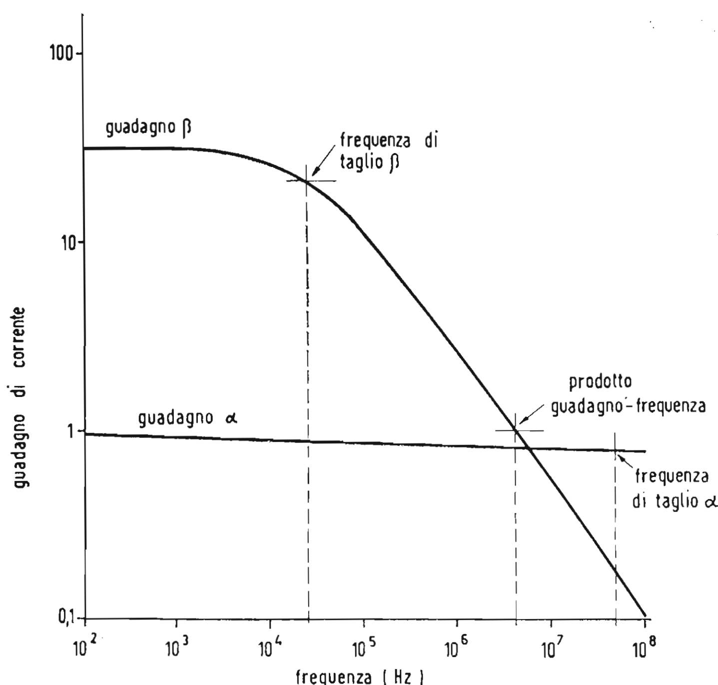


FIG. 8 - Variazione dei guadagni di corrente α e β con la frequenza.

alta nella connessione a base comune. Un parametro, che rende conto del comportamento del transistore alle frequenze elevate, è chiamato prodotto quadagno-frequenza, e rappresenta la frequenza alla quale il guadagno β si riduce al valore unitario. (Fig. 8).

5.2 - Corrente di fuga.

La corrente di fuga é la debole corrente che circola in un transistore quando esso é polarizzato all'interdizione. Due componenti principali costituiscono la corrente di fuga: quella di superficie, poco dipendente dalla temperatura, e quella di saturazione, che è funzione della concentrazione di atomi estranei nel semiconduttore, e fortemente influenzata dalla temperatura. La corrente di fuga di collettore, per lo più chiamata I_{CO} ovvero I_{CBO}, è quella che circola fra collettore e base polarizzati inversamente, quando il circuito base-emettitore é aperto. La corrente di fuga di emettitore I_{EO}, é invece quella che circola fra base ed emettitore, quando la relativa giunzione é polarizzata in senso inverso, ed il circuito di collettore é interrotto. Nel caso

pratico di un transistore collegato in circuito a emettitore comune con la base aperta, la corrente di fuga circolante nell'uscita (collettore) é circa pari alla corrente di fuga I_{CO} moltiplicata per il guadagno di corrente β, cioè molto maggiore della pura corrente di fuga di collettore, in quanto la corrente I_{CO} proveniente dal collettore, circolando nello spazio fra base ed emettitore, è vista dal transistore come una corrente di segnale, e quindi amplificata. Sovente essa é denominata I_{CEO}. Per contro, se la base é cortocircuitata all'emettitore, nel transistore a emettitore comune circola una corrente di fuga pari a I_{CO}, perché é come se la giunzione base-emettitore non esistesse.

Se ora la base è ritornata all'emettitore attraverso ad una resistenza (questo è il caso più frequente in pratica) la corrente di fuga del collettore assume un valore intermedio fra βI_{CO} e I_{CO}. Si può constatare che essa approssima βI_{CO} per valori molto alti della resistenza, ed I_{CO} quando il valore della resistenza tende a zero.

In prima approssimazione i transistori al silicio hanno correnti di fuga mille volte più piccole che i transistori al germanio. Per quanto riguarda la dipendenza dalla temperatura, in entrambi i casi le correnti di fuga si raddoppiano per un incremento di 8 ÷ 10 °C.

5.3 - Tensione di saturazione.

Per una data corrente d'ingresso sulla base, la tensione di saturazione collettore-emettitore é la minima tensione necessaria a mantenere il transistore in piena conduzione (cioè nella regione di saturazione). In condizioni di saturazione la tensione di collettore cade ad un valore più basso di quella di base, e sia la giunzione base-emettitore, sia quella collettore-base sono polarizzate in senso diretto; qualunque ulteriore aumento della corrente di base non produce più un aumento della corrente di collettore.

In fig. 9 per chiarezza sono riportate le caratteristiche di collettore di un transistore con l'indicazione delle regioni principali di funzionamento: quelle di saturazione ed interdizione intervengono nel progetto con transistori impiegati come commutatori.

5.4 - Tempi di commutazione.

Se si immagina di applicare all'ingresso di un transistore, connesso per esempio a emettitore comune, un impulso ideale di comando con fronti di salita e di discesa di durata nulla, l'impulso di uscita (corrente o tensione di collettore) non risulterà più ideale, ma sarà ritardato e con fronti più lenti (vedi fig. 10).

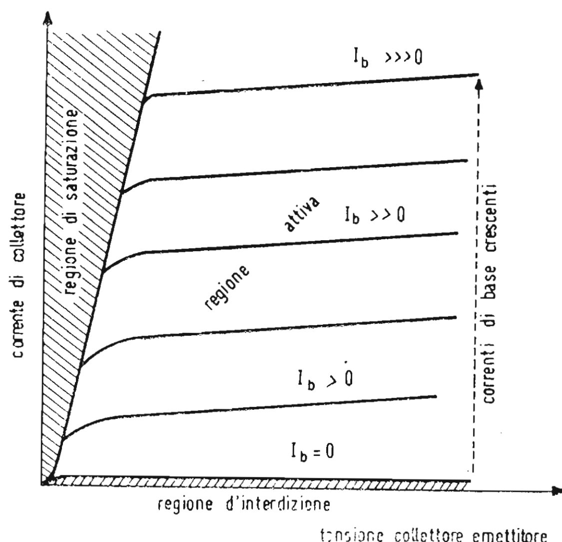


FIG. 9 - Principali regioni di funzionamento del transistore.

Il costruttore indica in generale sui cataloghi i quattro tempi caratteristici indicati sulla figura. Questa informazione permette al progettista anzitutto di controllare se il transistore è sufficientemente rapido per l'uso che ne vuole fare e, nel caso di transistori di potenza (per i quali questi tempi sono più lunghi), di verificare anche la dissipazione dovuta alla commutazione.

Quando l'impulso ideale é inizialmente applicato alla base, il transistore essendo all'interdizione, la corrente di collettore incomincia a scorrere solo dopo un tempo finito, t_d. Questo ritardo é dovuto alla capacità presentata dalla giunzione base-emettitore, che deve caricarsi affinché la giunzione stessa risulti polarizzata in senso diretto.

Da questo momento la corrente di collettore incomincia a crescere, ma impiega un tempo finito a raggiungere il valore finale. Questo tempo di salita che per convenzione, indica il tempo richiesto per passare dal 10% della corrente di collettore al 90% del suo valore finale, è chiamato t_r ed è determinato dal prodotto guadagno-frequenza e dalla capacità della giunzione collettore-base, oltre che dal guadagno di corrente β. Con correnti alte e tensioni basse prevale l'influenza del primo fattore, con correnti deboli e tensioni alte prevale il secondo.

Quando al termine dell'impulso di comando il transistore deve

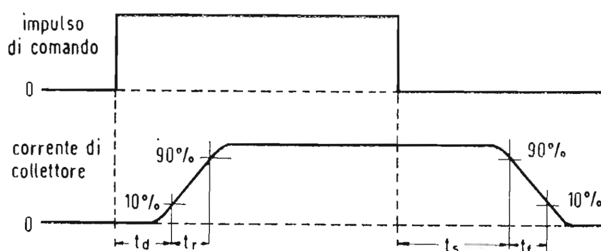


FIG. 10 - Forme d'onda per commutazione in saturazione.

ritornare all'interdizione, di nuovo osserviamo che la corrente di collettore non cambia istantaneamente. Ciò é dovuto alla presenza di un eccesso di portatori di cariche nella base, quando il transistore lavora nella regione di saturazione, e il tempo richiesto per lo smaltimento di queste cariche si chiama t_s. (Se si impedisce alla tensione di collettore di scendere al valore della tensione di saturazione, l'eccesso di cariche non si verifica, e t_s diventa trascurabile).

Una volta svuotata la base, la corrente di collettore scende, con un tempo non nullo, chiamato t_f. Questa ultima porzione di ritardo, paragonabile a t_r, dipende come questo dal prodotto guadagno-frequenza (inversamente proporzionale) e dalla capacità di collettore (direttamente proporzionale).

6 - Come scegliere un transistore.

Senza entrare nel dettaglio della circuiteria attorno ad esso, il transistore come va scelto? Ecco come abitualmente procede il progettista.

Forse il punto più critico é che il transistore sia previsto per la giusta tensione. Conoscendo i valori estremi della tensione che sarà applicata al transistore, la corrente massima nel carico, occorre considerare la dissipazione, in relazione alla possibilità di usare dei radiatori di calore.

Nel caso di transistori di potenza é a questo punto che si può prendere in considerazione la possibilità di suddividere la dissipazione fra più transistori uguali. Per esempio, con un certo radiatore e una certa dissipazione prefissati, l'aumento di temperatura individuale per due transistori in parallelo é pari a metà dell'aumento di temperatura di un solo transistore impiegato al loro posto.

Una tensione di alimentazione piuttosto elevata obbliga a scegliere un transistore ad alta tensione: in un tale caso si può prevedere l'impiego di transistori di bassa tensione in serie, i quali sono in generale di prezzo molto inferiore e di reperimento più facile. Lo stesso ragionamento sull'aumento di temperatura per un dato radiatore si applica anche con transistori in serie.

Una volta stabilite la tensione e la dissipazione richieste per un transistore, quest'ultimo può essere scelto con un guadagno appropriato, ricordando che il guadagno decresce sia per deboli correnti di collettore, sia per correnti che si avvicinano alle massime ammissibili.

Benché i semiconduttori teoricamente dovrebbero possedere una vita infinita, ciò é solo vero se le condizioni ideali di fabbricazione e di impiego susseguente sono raggiunte. La presenza di atomi di impurità incontrollabili, le condizioni superficiali, la tensione e la temperatura di funzionamento possono contribuire a produrre una degradazione o la fine della vita, talvolta istantaneamente, talaltra dopo un tempo che non si può prevedere.

E quando si tratta di sostituire un transistore difettoso o finito, e non si dispone di un tipo identico e, ancor peggio, non se ne conoscono le caratteristiche, le considerazioni di questo paragrafo (e naturalmente l'esame del circuito) permettono di scegliere un tipo equivalente o, in mancanza, di maggiori prestazioni. Il primo punto da considerare é ovviamente quello delle polarità che erano applicate al transistore da sostituire, per determinare se si trattava di un tipo N-P-N ovvero P-N-P.

Quindi si potranno determinare, esaminando l'alimentazione e il carico, la tensione e la dissipazione a cui dovrà sottostare il nuovo transistore. In seguito occorre vedere di che segnale d'ingresso si dispone per determinare quale guadagno di corrente sia richiesto dal transistore sostitutivo, nelle condizioni di corrente minima e massima nel carico. Un altro punto da tenere presente é l'estensione della banda passante, o più esattamente le esigenze in alta frequenza o in risposta ad uno scalino. E in ultimo l'influenza della corrente di fuga.

E' chiaro che, se del transistore da sostituire si possiedono le caratteristiche, la scelta del sostituto può essere fatta semplicemente sfogliando cataloghi e interpretando correttamente i dati.

In entrambi i casi, che si tratti di transistori di potenza o no, quando si é effettuata la sostituzione é quasi sempre necessario ritoccare alcuni valori del circuito esterno (per lo più resistenze), per portare il nuovo transistore a lavorare in un punto conveniente delle sue caratteristiche, salvo nel caso che il circuito fosse stato così astutamente progettato da risultare largamente indipendente dai parametri del transistore.

CAPITOLO II

PROVE

1 - Controllo dei transistori.

La possibilità di stabilire in che condizioni si trova un transistore é sovente di grande utilità per lo sperimentatore e il tecnico addetto alla manutenzione. Per fare esami approfonditi delle caratteristiche di un transistore occorrono apparecchiature specifiche, solitamente molto costose e di vario tipo. Nei paragrafi che seguono ci limiteremo ad esaminare dei metodi di prova molto semplici, assieme alla descrizione di alcuni circuiti di controllo di facile costruzione ed uso. Essi permettono di valutare le caratteristiche fondamentali di un transistore, da cui si possono trarre illazioni sulle altre caratteristiche.

2 - Transistore buono/cattivo.

In fig. 11 é riportato il più semplice circuito di prova che ci può dire se un transistore funziona, oppure no. Esso é disegnato per provare i transistori di tipo NPN. Quando la resistenza sulla base é collegata al polo positivo della batteria, la lampadina deve illuminarsi, e spegnersi quando la resistenza é collegata al polo negativo, se il transistore é buono. Per un transistore PNP si devono ottenere gli stessi risultati invertendo la polarità della batteria.

Una rapida prova del transistore dubbio si può anche effettuare con ohmmetro: la resistenza fra due elettrodi qualsiasi dovrebbe essere molto alta (oltre 10.000 ohm) in una direzione, e molto bassa

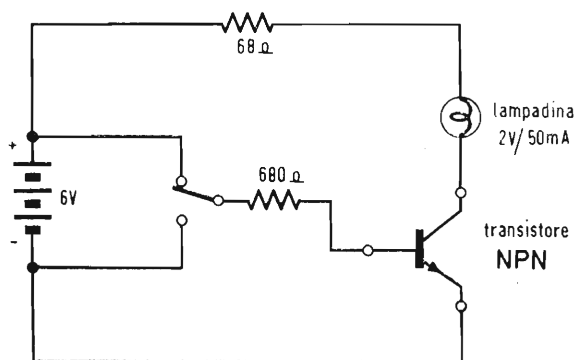


FIG. 11 - Prova-transistori.

nell'altra con due coppie di elettrodi, e cioé fra emettitore e base, come pure fra collettore e base (circa 100 ohm). E' importante in questa misura di assicurarsi che la tensione applicata sia sufficientemente bassa, in modo che nessuna tensione di valanga sia superata (in particolare quella della giunzione base-emettitore, che sovente é di pochi volt) per evitare di danneggiare il transistore per eccesso di dissipazione, quando si effettua la misura con polarizzazione inversa delle giunzioni.

3 - Misura del guadagno di corrente.

Le prove che abbiamo descritto finora permettono solo di determinare se le giunzioni di un transistore si comportano come tali. Per una valutazione migliore occorre poter misurare uno dei parametri più importanti del transistore: il guadagno di corrente.

Esistono in commercio vari tipi di prova-transistori, che generalmente forniscono una misura del guadagno di corrente β e della corrente di fuga di collettore, con adeguate gamme per i vari tipi di transistori. Essi sono un utile complemento della strumentazione di un laboratorio.

Un semplice circuito per la misura del guadagno β può anche essere rapidamente realizzato in laboratorio e adattato al controllo di transistori PNP e NPN. (Fig. 12).

Il principio di funzionamento é il seguente, per esempio nel caso di un transistore PNP. Questo é alimentato nella connessione ad emettitore comune, e si trova in un certo punto di lavoro nella re-

gione attiva. Regolando la corrente di base mediante R2 si fa in modo che la corrente di collettore bilanci il ponte costituito dal transistore sotto misura, R5, R6 e R7. In condizioni di equilibrio lo strumento M non é percorso da alcuna corrente, ed indica pertanto zero. A questo momento si inietta una corrente di base supplementare di circa 8 μA attraverso la resistenza elevata R4, che realizza con buona approssimazione una sorgente ideale di corrente. Sullo strumento é quindi direttamente indicato l'incremento di corrente nel circuito di collettore, il quale, diviso per 8 μA, fornisce il valore del guadagno β. Siccome 8 μA è un fattore costante, la scala dello strumento può essere calibrata direttamente in valori di β. Varie sensibilità del circuito di misura a ponte possono essere previste: per esempio con 0,8 mA fondo scala, i valori β vanno da zero a 100; con 2,4 mA si ottiene una scala β da zero a 300 fondo scala.

Conoscere il guadagno di corrente β può essere fondamentale durante lo sviluppo di un prototipo: la differenza di questo parametro fra transistori dello stesso tipo può essere rilevante, mentre numerosi circuiti, come ad esempio stadi differenziali, stadi complementari, stadi in controfase lavorano meglio con coppie di transistori con guadagni il più possibile uguali.

Inoltre, nel lavoro di manutenzione, é necessario stabilire se un transistore è buono o cattivo, se un altro tipo può sostituirlo, ecc.

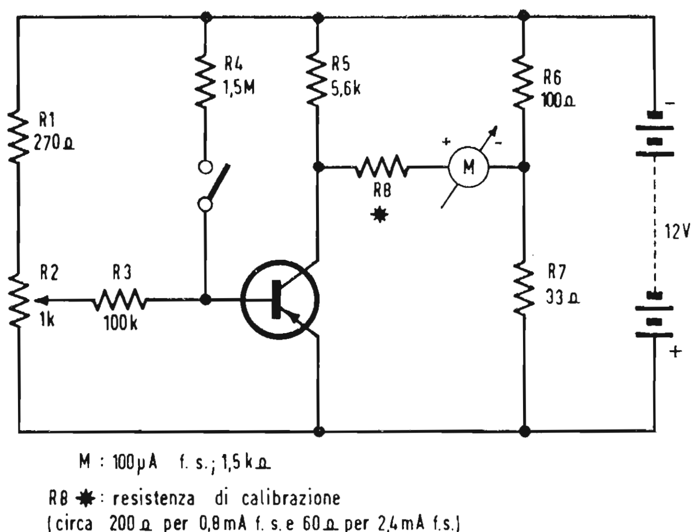


FIG. 12 - Misuratore di β.

Quando si misura il guadagno di corrente β, occorre tener conto di alcuni fattori fondamentali.

a) Il valore della corrente di collettore, a cui si fa la misura, influenza il guadagno β, e quindi la misura di β a un solo valore di corrente uguale per tutti i tipi di transistori non può dare risultati attendibili. Il prova-transistori deve quindi permettere di fare la misura in una gamma di varie correnti di collettore, a seconda che si tratti di transistori di piccola potenza o di potenza maggiore.

b) Misurando accuratamente β, si può constatare se esso è insufficiente. Transistori difettosi presentano un guadagno nullo o molto basso, oppure una carrente di fuga eccessiva. A differenza dei tubi elettronici, i transistori non presentano una diminuzione graduale del guadagno con l'uso, perché il materiale semiconduttore non si degrada o esaurisce il funzionamento normale. E generalmente il guadagno β non cambia con l'invecchiamento, salvo quando il transistore é difettoso o incorrettamente impiegato.

c) Occorre sempre tener presente che i transistori di qualunque tipo possono avere il guadagno β, che varia entro ampi limiti. Il guadagno pubblicato dal fabbricante é solo la media delle misure effettuate su un grande numero di elementi. Un transistore con un β piuttosto basso può ancora essere utilizzabile in un circuito non critico, per esempio risultare soddisfacente in uno stadio a bassa frequenza, ma insoddisfacente in uno stadio ad alta frequenza.

4 - Misura delle correnti di fuga.

Anche le correnti di fuga si possono misurare o controllare con i mezzi del laboratorio (vedi fig. 13).

I_{CBO} é la corrente di fuga fra collettore e base, con l'emettitore aperto. Come si vede dalla figura 13-A, si applica una tensione di 3 volt fra collettore e base, e lo strumento, con una resistenza limitatrice di protezione in serie, é posto nel circuito di collettore.

Spostando la connessione della base all'emettitore (fig. 13-B) si misura la corrente I_{CEO}, di fuga fra il collettore e l'emettitore, con la base aperta. Queste due correnti rappresentano le correnti di fuga di collettore, e quanto più sono ridotte tanto migliore è il transistore. I_{CEO} é generalmente molto maggiore di I_{CBO}, come già abbiamo visto. Infatti, misurando I_{CEO} la corrente esterna di base é nulla, ma la giunzione base-emettitore sarà ancora percorsa da I_{CBO}, che sarà vista dal transistore come un segnale di entrata e che produrrà nel collettore una corrente di intensità $\beta . I_{CBO}$, essendo β il guadagno di corrente a quella data corrente di collettore. La relazione fra le due correnti di fuga è quindi:

$$I_{CEO} = I_{CBO} + \beta . I_{CBO} = (1 + \beta)\ I_{CBO}$$

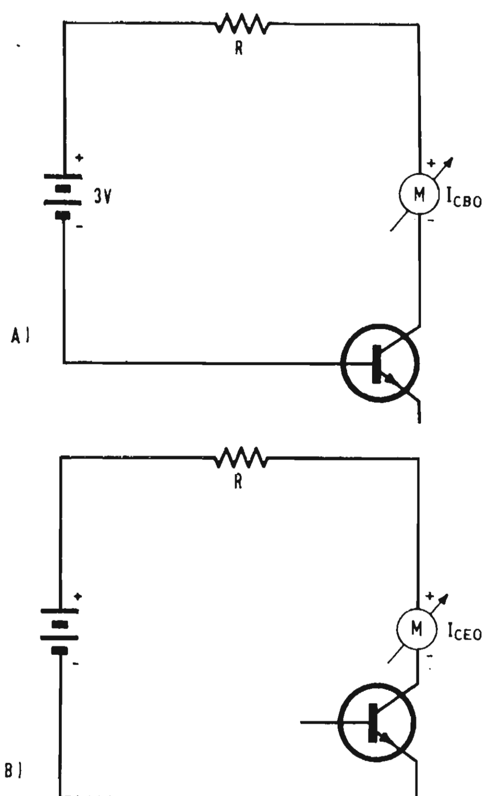


FIG. 13 - Misura delle correnti di fuga.

Come già abbiamo accennato, le correnti di fuga di un transistore dipendono fortemente dalla temperatura (e poco dalla tensione applicata). Per effettuare misure attendibili é pertanto necessario operare in un ambiente a temperatura costante (eventualmente in un bagno d'olio) ed evitare di toccare con le dita i transistori.

Si impiegherà preferibilmente un paio di pinze a molla per il maneggio dei transistori, e nel caso in cui si sia fatto uso del saldatore su di essi, si attenderà un tempo ragionevole prima di incominciare le misure (circa 5 minuti).

La corrente di fuga di vari transistori dello stesso tipo può variare entro ampi limiti, e per interpretare correttamente le misure occorre ricordare alcune proprietà fondamentali.

a) La corrente di fuga di qualsiasi transistore é generalmente specificata dal costruttore, almeno per una certa temperatura, o per alcuni valori di temperatura.

b) Un transistore con una certa corrente di fuga può essere utilizzato in determinate applicazioni e non in altre.

c) I transistori al silicio hanno correnti di fuga molto inferiori di quelli al germanio.

d) La corrente di fuga di collettore della maggior parte dei piccoli transistori al silicio a + 25 °C è inferiore al microampere.

e) I transistori di potenza al silicio possono avere correnti di fuga dell'ordine di 50 microampere. Quelli al germanio di alcuni milliampere, sempre a + 25 °C.

5 - Possibili misfatti nell'impiego dei transistori.

Il fabbricante, nonostante la cura con la quale ha preparato le specificazioni decidendo in particolare i valori limite entro i quali il transistore é garantito, non può essere ritenuto responsabile se succedono danni al transistore per un trattamento malaccorto di esso.

Ci sono due classi di possibili maltrattamenti, che possono essere inferti involontariamente al transistore: quelli meccanici e quelli elettrici. Se il progettista si abitua a conoscerli e ad evitarli, i suoi circuiti sfrutteranno in pieno la lunga durata di vita dei transistori.

5.1 - Misfatti meccanici.

— Lasciarli cadere - Il materiale semiconduttore è duro e fragile, e può danneggiarsi a causa di un urto. Se si lascia cadere un transistore su una superficie rigida da un'altezza di una decina di centimetri, esso subisce una decelerazione di 500 g (cioé é come se gli fosse applicata una forza pari a 500 volte il suo peso). Da un metro, la sollecitazione può salire a 10.000 ÷ 20.000 g.

Inserire un transistore in un supporto a molla, può provocargli un urto di 1.000 g; anche maggiore può provocarlo il semplice atto di accorciare i terminali con un colpo secco di tronchesino, a causa dell'onda d'urto che si propaga lungo il filo.

Qualunque di questi urti può rompere o sfaldare il materiale semiconduttore, rendendo il transistore dubbio o inutilizzabile.

— Piegare i terminali. - Si può produrre la rottura di un filo piegandolo più volte avanti e indietro. Ciò é particolarmente vero per i terminali dei transistori, nel punto in cui escono dall'involucro. Se i terminali sono stati piegati durante la manipolazione e le prove, possono anche rompersi successivamente, apparentemente da

soli. Se si torcono dei terminali piatti, l'involucro può fessurarsi, lasciando passare l'umidità che finirà per danneggiare il semiconduttore, causando un graduale peggioramento delle caratteristiche. La buona regola é di non piegare o torcere i terminali a meno di 3 ÷ 4 mm dall'involucro.

— Surriscaldare. - Se durante la saldatura in posizione del transistore si oltrepassa la temperatura massima delle giunzioni, quest'ultime si distruggono, presentando generalmente un corto circuito. Brusche dilatazioni possono far perdere l'ermeticità all'involucro. Le regole da seguire sono: se si fa uso di uno zoccolo, estrarre il transistore durante ogni saldatura (anche da quelli adiacenti!); se il transistore é saldato direttamente nel circuito, tenere i terminali mediante mollette o pinze fra l'involucro e il punto di saldatura: questo sistema devia la maggior parte del calore che entrerebbe nel transistore. E naturalmente saldare pulito e rapidamente, usando un saldatore di potenza adeguata (di solito fra 20 e 50 watt).

— Pulizia a ultrasuoni. - Talvolta nell'industria si usa pulire circuiti completi in un bagno mediante ultrasuoni.

Anche in questo caso si corre il rischio di danneggiare i transistori per fenomeni di risonanza con le vibrazioni, in particolari quelli che usano le tecnologie del germanio. E' buona norma misurare e sorvegliare la pressione ultrasonica nel liquido del bagno, che dovrebbe essere intorno ai 200 g/cm^2, valore generalmente sufficiente per ottenere la pulitura.

5.2 - Misfatti elettrici.

— Sovratensioni. - La prima regola é di non oltrepassare mai la tensione massima specificata dal costruttore. Ciò significa anzitutto di scegliere con criterio il transistore in funzione della tensione di alimentazione, tenendo conto, se necessario, della superimposizione su di essa di una eventuale tensione di segnale. Sovratensioni transitorie possono prodursi connettendo o sconnettendo il transistore o altri elementi in un circuito sotto tensione: da qui scaturisce la seconda regola, che consiglia di togliere l'alimentazione prima di fare qualsiasi modifica.

Altra regola: é bene che il saldatore sia a terra, per evitare di applicare la tensione di rete al transistore, per capacità o per corrente di fuga nel saldatore.

Anche il controllo di un transistore mediante un ohmmetro può applicare una tensione eccessiva: la tensione inversa di base è generalmente compresa fra 1 e 5 volt, e molti strumenti fanno uso di una batteria di 22,5 volt. Impulsi anche brevi di sovratensione possono provocare in prossimità delle giunzioni la creazione di impurità concentrate, che fanno cambiare le caratteristiche del transistore.

— Sovrapotenza. - Si é ricondotti al caso del sovrariscaldamento, che incomincia a manifestarsi con la diminuzione permanente del guadagno e della tensione massima, e può arrivare alla distruzione del transistore. Se si fanno misure a livelli di potenza elevati, occorre usare dei radiatori di calore, o fare misure impulsive a bassa ripetizione.

— Vari. - Sconnettendo la base di un transistore con la tensione applicata fra collettore ed emettitore, si può incorrere nella deriva termica cumulativa. Infatti la corrente di fuga è moltiplicata in questo caso per il guadagno di corrente intrinseco, e quindi aumenta, provocando un riscaldamento delle giunzioni, ciò che fa aumentare la corrente di fuga, e così via. Se il carico é induttivo, con poca resistenza ohmica, la corrente può aumentare a valori distruttivi.

E' buona norma evitare i circuiti, che per funzionare sfruttano al limite le caratteristiche dei transistori: sarà anche più facile trovare dei sostituti, quando diventasse necessario.

Le cariche elettriche statiche, le quali possono accumularsi con tempo secco, sono dannose per tutti i transistori, in particolar modo per quelli rapidi. Una buona precauzione é naturalmente l'uso di umidificatori nei magazzini e nei laboratori. Inoltre é preferibile che i transistori siano conservati in scatole metalliche piuttosto che isolanti, del tipo cioé in polistirolo espanso. Quando si maneggiano i transistori e si fanno prove é bene che tutti gli apparecchi siano provvisti di un collegamento di massa (compreso l'operatore, se possibile: sovente bastano scarpe a suola non isolante).

Capitolo III

IL TRANSISTORE A EFFETTO DI CAMPO

1 - Generalità.

Il funzionamento del transistore a effetto di campo (FET) é basato su un principio completamente differente da quello del transistore convenzionale.

Mentre in quest'ultimo l'amplificazione é ottenuta per l'interazione di due correnti differenti, nel FET si controlla la conduttività di una barretta di materiale semiconduttore (canale) ai cui estremi sono applicati due contatti ohmici, usualmente denominati sorgente (S) e drenaggio (D) o assorbitore, mediante una carica elettrostatica, applicata ad un elettrodo di controllo, o porta (P). Si vedrà come questo principio consenta di ottenere impedenze di ingresso molto forti.

Nella versione che si chiama « a giunzione », é appunto una giunzione P-N, che viene usata quale elettrodo di controllo. Fino a che questa giunzione é polarizzata in senso inverso, essa funziona da elettrodo isolato per applicare la carica elettrostatica di controllo, e nel suo circuito fluisce unicamente la debole corrente di fuga della giunzione stessa; l'impedenza d'ingresso è pertanto molto alta.

Nella variante MOS (metalli - ossido - silicio) del transistore a effetto di campo si usa invece un elettrodo di controllo metallico, separato dal sottostante canale semiconduttore di silicio da uno strato isolante, generalmente ossido di silicio. Con questo tipo di elettrodo l'impedenza d'ingresso può essere ancora maggiore, né si degraderà per qualsiasi polarità applicata alla porta.

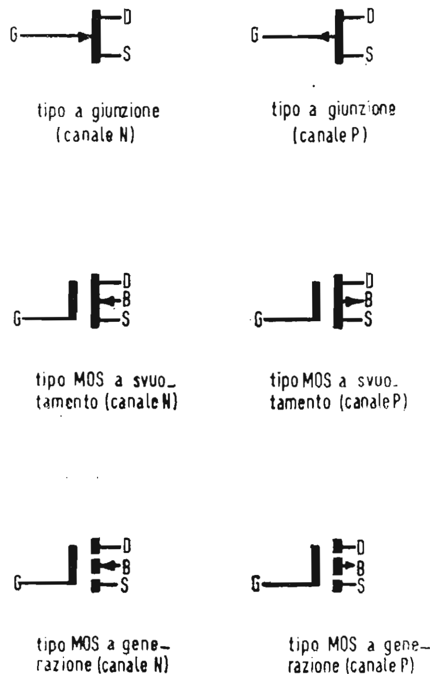


FIG. 14 - I sei tipi di transistore a effetto di campo.

Il canale di un transistore a effetto di campo può essere realizzato in silicio di tipo P ovvero silicio di tipo N.

Se il FET é del tipo a giunzione, é evidente che sono possibili due tipi, uno con la giunzione di controllo P-N ed uno con la giunzione N-P, che richiederanno tensioni opposte di controllo.

Nel MOS-FET, a elettrodo di controllo semplicemente metallico ed isolato, sono possibili due tipi con funzionamento fondamentalmente differente, per ognuno dei tipi di canale, cioé silicio P, ovvero N; in totale cioé quattro tipi MOS.

I due tipi fondamentali MOS sono chiamati « a svuotamento » (depletion) e « a generazione » (enhancement). Nel tipo a svuotamento i portatori di carica sono presenti nel canale, ed il canale é conduttivo quando nessuna polarizzazione é applicata alla porta. Con una tensione sulla porta tale da « respingere » i portatori di carica nel canale (N ovvero P) quest'ultimo si svuota e la sua conduttività diminuisce e al limite si annulla. Nel tipo « a generazione »

la porta deve essere polarizzata affinchè si producano portatori di carica nel canale, ed esso diventi conduttore. Senza polarizzazione il canale non possiede praticamente conduttività.

La fig. 14 riporta i simboli impiegati per identificare i due tipi a giunzione ed i quattro a porta isolata (MOS). Senza entrare in dettagli costruttivi, notiamo soltanto che i quattro tipi MOS sono ottenuti per diffusione su una piastrina di silicio (per esempio diffusione N su una base P, o viceversa). Il canale é costituito dalla diffusione, che é controllabile con esattezza, mentre la piastrina di base non gioca alcun ruolo nel funzionamento, ma possiede ugualmente una connessione elettrica con l'esterno (B). Questa connessione é generalmente posta a massa, qualunque sia il circuito, e non influenza gli altri elettrodi, ma agisce solo, in un certo modo, da schermatura. Talvolta é già collegata internamente alla sorgente.

Come si vede, a causa del numero di varianti, la scelta, ed ancora più la sostituzione, di un transistore ad effetto di campo richiedono una maggiore attenzione che nel caso del transistore convenzionale.

A questo proposito vorremmo far notare che la differenza principale (a parte le polarità di alimentazione e polarizzazione) fra i tipi a svuotamento e a generazione é la seguente: nel tipo a svuotamento la giunzione o l'elettrodo isolato di comando sono fisicamente rea-

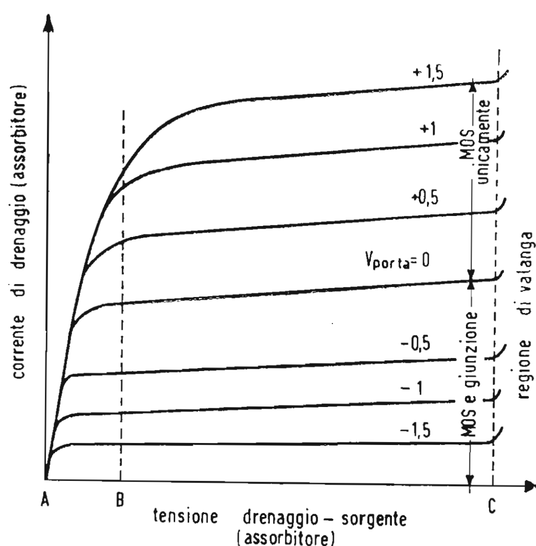


FIG. 15 - Caratteristiche di uscita tipiche per transistore a svuotamento.

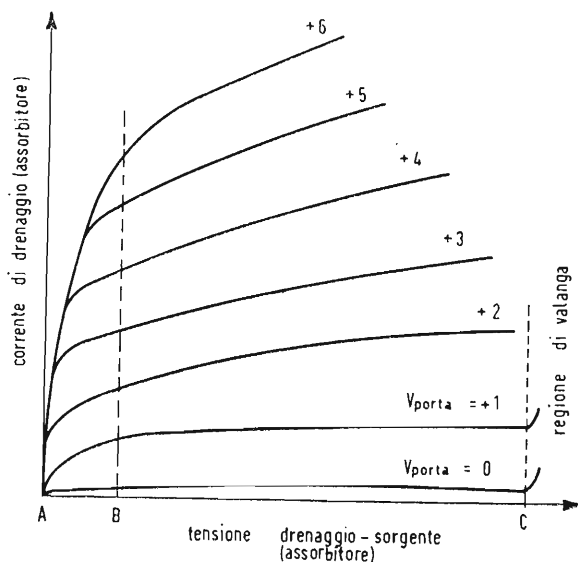


FIG. 16 - Caratteristiche di uscita tipiche per transistore MOS a generazione.

lizzati su una porzione soltanto del canale, in genere più lontana dal contatto ohmico di uscita (drenaggio), in quanto é sufficiente poter diminuire la conduttività del canale in un punto; nel tipo a generazione invece l'elettrodo di controllo deve coprire l'intera regione tra sorgente e drenaggio, in modo che la tensione applicata possa indurre un canale conduttore fra di essi. Quest'ultimo arrangiamento costruttivo comporta evidentemente una maggiore capacità fra l'entrata e l'uscita con conseguenti problemi più delicati di neutralizzazione e stabilizzazione nel caso di circuiti amplificatori.

2 - Caratteristiche.

Le caratteristiche tipiche tensione-corrente del transistore MOS a svuotamento (e così pure del tipo a giunzione) sono riportate in fig. 15. Come si può notare con polarizzazione nulla c'é già una conduzione sostanziale. Essa viene ridotta e al limite annullata mediante l'applicazione di una polarizzazione inversa. Nel tipo MOS a elettrodo isolato si può anche applicare una polarizzazione diretta, che, inducendo portatori di carica supplementari nel canale, ne aumenta ancora la conduttività. Ciò non vale per il tipo a giunzione: se si ap-

plica una tensione diretta, l'impedenza d'ingresso cade a valori molto bassi, la corrente d'ingresso aumenta considerevolmente ed il guadagno decresce.

Nella regione, che potremmo chiamare « pentodica » (B-C sulla figura), il transistore è particolarmente usato come amplificatore di tensione ad alta impedenza d'ingresso. Nella regione « ohmica » (fra i punti A e B) la variazione lineare della resistenza del canale rende un grande servizio nelle applicazioni in cui il transistore é impiegato come una resistenza variabile comandata da una tensione: per esempio un controllo automatico di guadagno, un « chopper » per amplificatori a corrente continua, ecc.

Le curve di fig. 15 sono relative a transistori a canale N: nel caso di transistori a canale P, le polarità delle tensioni e correnti sono invertite. Questa considerazione si applica anche alle curve di fig. 16, relative al transistore MOS a generazione.

3 - I tre circuiti fondamentali.

Come nel caso dei transistori convenzionali, tre sono le configurazioni in cui si può utilizzare il transistore a effetto di campo (sia a giunzione, sia MOS): sorgente comune, porta comune e drenaggio comune.

Il circuito a sorgente comune é il più usato: la fig. 17 ne mostra un esempio per un transistore MOS a svuotamento e canale N. Questa configurazione presenta alta impedenza d'ingresso, media impedenza d'uscita e guadagno di tensione maggiore dell'unità. La polarizzazione della porta (come nel caso della griglia nei circuiti a

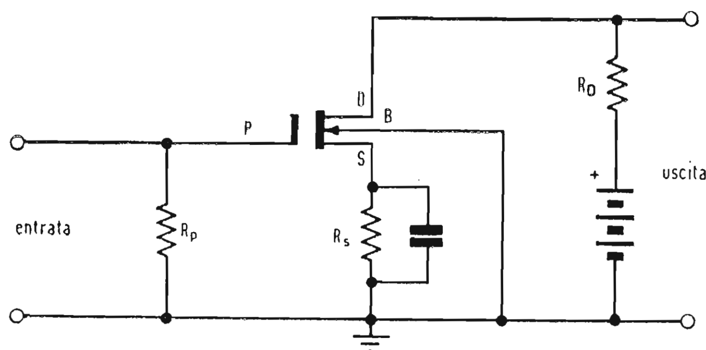


FIG. 17 - Circuito a sorgente comune per transistore MOS.

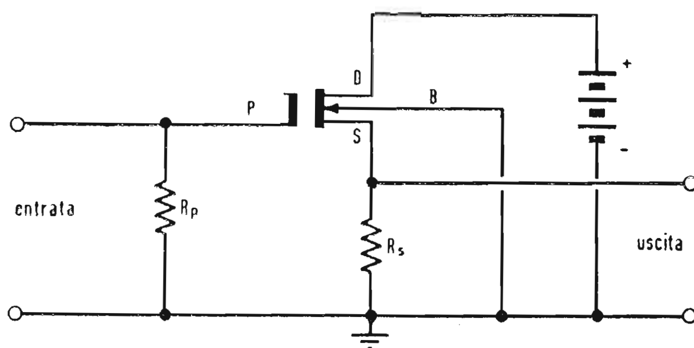


FIG. 18 - Circuito a drenaggio comune per transistore MOS.

valvole) può essere fissa oppure automatica. Se la resistenza R_S di polarizzazione automatica nel circuito di sorgente non é shuntata da un condensatore, si introduce una reazione negativa.

Il circuito a drenaggio comune (un esempio è riportato in fig. 18) è caratterizzato da un'impedenza d'entrata anche più alta che nel caso precedente, una bassa impedenza d'uscita, nessuna inversione di fase fra entrata ed uscita ed un guadagno di tensione circa pari all'unità. Questo circuito è specialmente impiegato come adattatore d'impedenza. L'impedenza d'ingresso è praticamente pari alla resistenza R_P, che può essere di alcuni megaohm o decine di megaohm. Se R_P invece di essere ritornata a massa è ritornata alla sorgente, l'impedenza d'ingresso è molto maggiore di R_P.

Il circuito a porta comune (fig. 19) ha bassa impedenza d'ingresso, alta impedenza di uscita, moderato guadagno di tensione e si presta particolarmente bene per la sua stabilità come amplificatore ad alta frequenza. In questa applicazione in genere non richiede neutralizzazione.

4 - Controlli e prove.

Anche i transistori a effetto di campo possono venire provati con un semplice circuito per rivelare un'interruzione o un cortocircuito. La fig. 20 riporta lo schema di un circuito molto semplice che permette di controllare i transistori a svuotamento con canale N ed i transistori MOS a generazione con canale P. (Per i tipi a svuotamento con canale P e a generazione con canale N é necessario

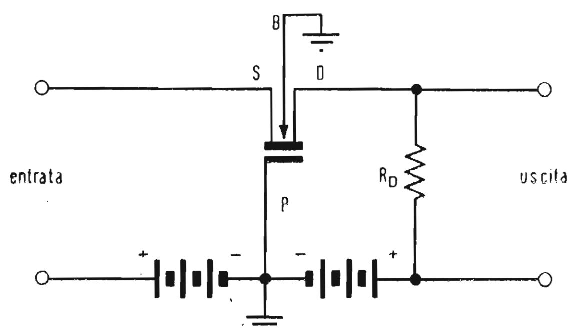


FIG. 19 - Circuito a porta comune per transistore MOS.

invertire le polarità delle batterie e sostituire il transistore PNP del circuito di prova con un transistore NPN).

Se il transistore é MOS, il substrato, o base, B va collegato alla sorgente S. Se é del tipo a doppia porta, ciascuna porta va provata separatamente.

Nel caso di transistore a svuotamento, sia del tipo a giunzione sia MOS, con canale N, se la lampadina si accende quando l'interruttore I é aperto, e si spegne quando l'interruttore é chiuso, il transistore é buono. Se la lampadina si accende in qualunque posizione dell'interruttore, il transistore ha un corto-circuito. Se la lampadina rimane spenta con l'interruttore aperto o chiuso, il transistore ha un'interruzione. Per il transistore MOS a generazione con canale P si ottengono indicazioni opposte della lampadina.

Un altro semplice circuito (Fig. 21), consigliato dalla RCA, permette, in congiunzione con un oscilloscopio qualsiasi di bassa frequenza avente sensibilità in verticale di almeno 10 mV per centimetro e accessibilità dell'amplificatore orizzontale, di tracciare le curve caratteristiche tensione-corrente. Con questo circuito non si può avere contemporaneamente sullo schermo tutta la famiglia di curve, ma ogni curva può venir tracciata sequenzialmente agendo sul commutatore di polarizzazione, il quale fornisce 10 valori di polarizzazione fra 0 e — 10V in gradini di — 1V ciascuno. Il trasformatore é indispensabile come trasformatore di isolamento (si ponga mente alla posizione dell'unica massa e ai punti di prelievo del segnale). La frequenza di ripetizione è pari alla frequenza di rete (50 Hz) e sufficiente quindi a dare un'immagine senza scintillio. Il potenziometro R permette di scegliere il valore massimo di tensione drenaggio-sorgente: occorre fare attenzione a non applicare una tensione ecces-

siva in modo da non portarsi nella regione di valanga, nè di superare la massima tensione ammissibile fra porta e drenaggio.

Dalle curve sullo schermo dell'oscilloscopio é possibile dedurre (calibrando le scale) tutti i più importanti parametri del transistore. L'adattatore é rappresentato per le misure su di un transistore a svuotamento con canale N, ma può facilmente essere modificato per le misure sugli altri tipi di transistori a effetto di campo.

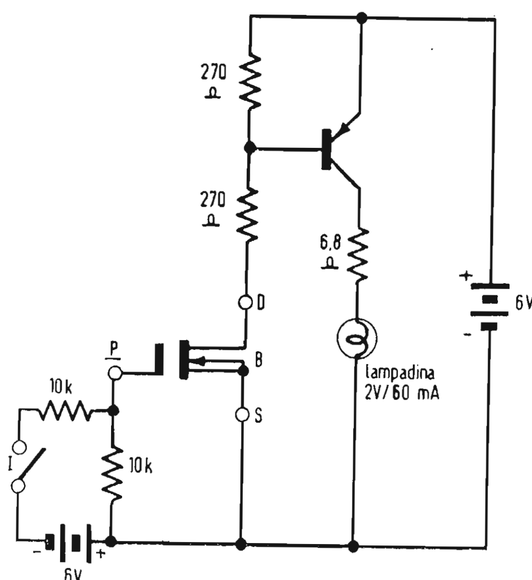


FIG. 20 - Circuito di prova per transistori a effetto di campo.

Il principio medesimo può anche essere sfruttato per progettare un adattatore per il tracciamento delle curve tensione-corrente dei transistori convenzionali, tenendo presente che per l'eccitazione di base sono meglio indicati gradini di corrente che gradini di tensione.

Terminiamo ricordando che il buon funzionamento dei transistori MOS dipende dalla perfezione dello strato isolante fra l'elettrodo di controllo (porta) ed il canale. Se questo strato é perforato a causa di una tensione applicata eccessiva o di una scarica di elet-

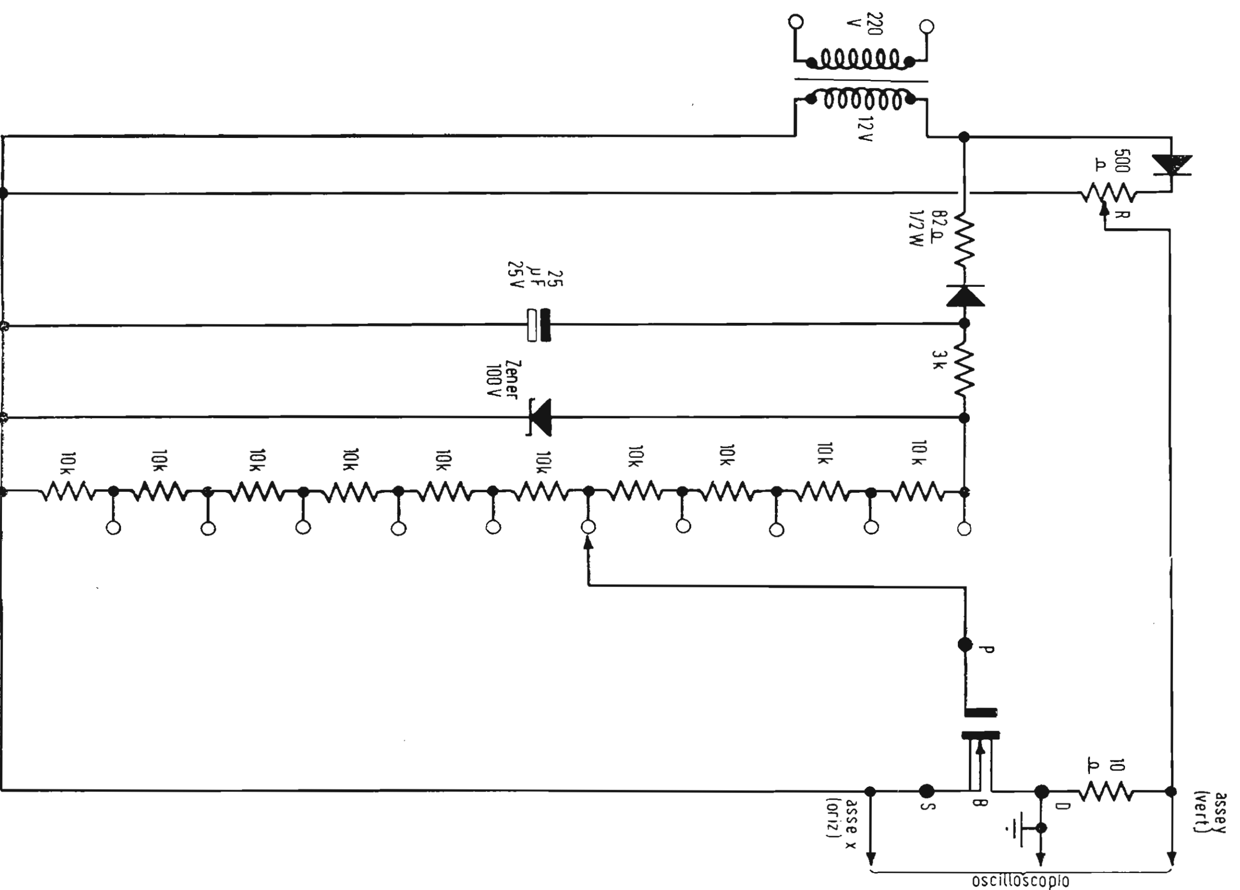
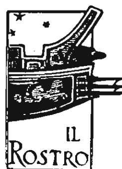


FIG. 21 - Adattatore per oscilloscopio per il tracciamento delle curve caratteristiche di transistori a effetto di campo.

tricità statica accumulatasi sulla porta durante le manipolazioni, il dànno é irreparabile. Se l'area é piccola la corrente di fuga risultante può non disturbare in certe applicazioni e semplicemente l'impedenza d'ingresso si abbassa, assumendo valori simili a quelli dei transistori a effetto di campo a giunzione. E' per questa ragione che i transistori MOS sono sempre provvisti di imballaggi speciali di carta d'alluminio che tiene in corto-circuito i vari elettrodi per evitare la formazione di cariche statiche. Molti transistori MOS sono autoprotetti, perchè hanno incorporati due diodi Zener in opposizione collegati fra la porta e la sorgente, ciò che però produce una degradazione dell'impedenza d'ingresso.

Finito di stampare presso la
TIPOGRAFIA EDIZIONI TECNICHE - MILANO
Via Baldo degli Ubaldi 6 - Telefono 36.77.88
Marzo 1972





Lire 1.100